

DESARROLLO DE UN CONJUNTO DE HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS ACOPLADO DE AEROGENERADORES EN ALTA MAR

Trabajo presentado en el 51º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, celebrado en Gijón del 17 al 19 de octubre de 2012. 3^{er} premio

Gutiérrez J.E., Departamento de Tecnología Naval, Universidad Politécnica de Cartagena

Zamora B., Departamento de Ing. Térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena

García J., CompassIS

Esteve J.A., Departamento de Tecnología Naval, Universidad Politécnica de Cartagena

0. Resumen

Existe una urgente necesidad en el estudio del comportamiento de aerogeneradores en alta mar. En este trabajo se presentan dos nuevas herramientas de ingeniería, de libre acceso, denominadas FASTLognoter y MorisonForm. La primera de ellas emplea como base en su desarrollo, las rutinas FAST (simulador aeroelástico de aerogeneradores, desarrollado por NREL), añadiendo nuevas capacidades y preprocesadores.

La segunda herramienta, MorisonForm se desarrolla para obtener la respuesta dinámica de plataformas empleadas como soporte en las diferentes propuestas existentes para aerogeneradores en alta mar. La integración de esas dos herramientas ofrece un software útil, que permiten llevar a cabo un análisis acoplado en este tipo de sistemas, de una manera sencilla. Una ventaja relevante de estas herramientas es la posibilidad de analizar un gran número de casos, contemplando diversas alternativas de diseño. Se presenta además, el proceso de análisis acoplado (cargas aerodinámicas más cargas hidrodinámicas), mediante el uso de estas herramientas. El estudio de la influencia de diversos parámetros puede llevar a un diseño óptimo.

Abstract

There is an urgent need to study the performance of the offshore wind turbines. In this work, it is presented two new applied engineering tools, freely available, called FASTLognoter and MorisonForm. The first one is based on FAST (a comprehensive aeroelastic simulator code for wind turbines, developed by NREL), adding new capabilities and pre-processors. On the other side, MorisonForm is developed to obtain the dynamic response of different types of support platform in offshore wind turbines. The integration of these two tools gives a useful tool-kit, which allows a coupled analysis of offshore wind turbines. This work presents the process for conducting this coupled analysis, using the regarded tool-kit. A relevant advantage is its parametric feature, permitting the user to analyse a massive group of cases. Furthermore, the effects of several parameters on the behavior of a reference offshore wind turbine are presented, in order to achieve an optimal design.

1. Introducción

En el ámbito de la producción de energía, la tendencia actual está dirigida hacia un cambio de modelo, apostando por las energías renovables como la energía eólica. En los últimos años, diferentes gobiernos han promovido la energía eólica terrestre ("onshore") como fuente principal de energía renovable. Sin embargo, este tipo de energía tiene algunas limitaciones, tales como la falta de zonas con recur-

Índice

Resumen / Abstract

1. Introducción

2. Desarrollo de las herramientas FASTLognoter y MorisonForm

2.1. Breve revisión sobre la teoría de Fast/aerodyn y MorisonForm

2.2. Descripción del problema

2.3. Características de FASTLognoter Y MorisonForm

3. Energía eólica offshore: un problema de acoplamiento dinámico

3.1. Flujo de trabajo con FASTLognoter y MorisonForm

4. Un caso de aplicación: optimización de un aerogenerador marino flotante

4.1. Optimización con FASTLognoter

4.2. Análisis con MorisonForm

4.3. Limitaciones en el diseño de aerogeneradores offshore

5. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Bibliografía

so eólico suficiente o el importante impacto visual. Puesto que las materias primas tradicionales y el petróleo siguen en una escalada continuada de precios, es necesario buscar un nuevo horizonte en la energía eólica, la denominada energía eólica marina ("offshore"). Entre las ventajas de este tipo de energía, pueden citarse la mayor disponibilidad de áreas de actuación, la disminución del impacto visual y del impacto acústico, y la posibilidad de obtener mayores instalaciones. Lógicamente, estas expectativas deben ser confirmadas mediante la investigación teórica, experimental y el desarrollo de prototipos (Burton [1]; Hau [2]; Manwell [3]; Sathiyajith [4]).

Puede considerarse que el primer aerogenerador "offshore" de gran escala (2,3 MW) fue el Hywind (Norwegian company StatoilHydro, siendo Siemens el constructor de la turbina), situado en la costa noruega del Mar del Norte. Hoy en día, se están construyendo nuevos prototipos en USA y en el Mar del Norte, para conseguir alcanzar la cifra de los 5 MW de potencia por aerogenerador (NREL 5 MW Baseline Wind Turbine, OC3-Hywind Turbine). Actualmente se ha avanzado en el desarrollo de herramientas informáticas para estimar el recurso eólico de una determinada zona (por ejemplo, WAsP+WindFarmer), o para el análisis del comportamiento de los aerogeneradores. En este último campo, puede decirse que NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) es una de las entidades de referencia, siendo su código FAST uno de los más populares y validados. Otros códigos como HydroDyn (cálculo de las cargas de oleaje), o AeroDyn (cálculo de cargas aerodinámicas), han sido acoplados con FAST, permitiendo así un análisis más detallado y aproximado. Además, NREL desarrolla más aplicaciones de diversa índole para el tema de interés (FoilCheck, TurbSim...). La mayoría de las herramientas actuales destinadas al análisis de aerogeneradores son a menudo son poco accesibles y caras, por ejemplo: GH Bladed, o bien sin entorno de usuario (GUI, Graphical User Interface) y complejas en su manejo cuando son de libre acceso, como ocurre en el caso de FAST.

Es preciso avanzar además en la determinación del comportamiento de los aerogeneradores sometidos conjuntamente a cargas de oleaje y de viento, así como en el estudio de los sistemas de fondeo de las estructuras flotantes, pues estas estructuras presentan un comportamiento complejo, debido a la variedad de solicitaciones a la que son sometidas durante su servicio (véase la Figura 1), tales como: oleaje, viento, impacto de icebergs, interacción con el fondo oceánico, corrientes y mareas... Todo ello hace necesario el desarrollo de herramientas que permitan el acoplamiento de las diferentes solicitaciones que intervienen en el problema en estudio.

En España, resulta indispensable conferir un avance significativo a este campo, si se desea cumplir con uno de los objetivos del Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER, 2011-2020). Así pues, la generación y validación de herramientas de software que permitan el estudio, el análisis y el diseño de un aerogenerador "offshore" sometido a la aplicación de cargas de viento, de oleaje y sistemas de fondeo, se plantea como uno de los principales retos de este nuevo campo, junto con el desarrollo de nuevos prototipos para aerogeneradores "offshore".

A la vista de lo expuesto anteriormente, el problema considerado y de las carencias detectadas, se propone como objetivo específico el desarrollo de aplicaciones software para el cálculo y diseño de aerogeneradores "offshore", a partir de herramientas tales como FAST/AeroDyn, el análisis dinámico de estructuras flotantes, la determinación de solicitaciones producidas por el oleaje y el desarrollo de herramientas que permitan un estudio de los sistemas de fondeo y posicionamiento de las estructuras flotantes. Pueden incluirse además, el análisis de los parámetros relevantes que influyen en el comportamiento global del aerogenerador, permitiendo la optimización del diseño en función de distintos condicionantes, tales como las car-

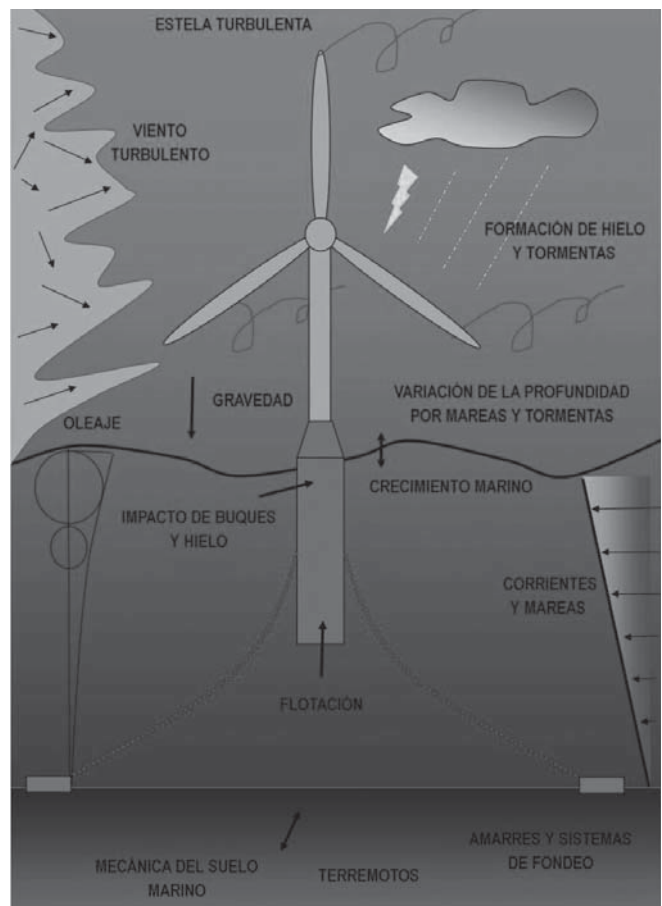


Figura 1: Esquema de las solicitaciones que recibe aerogenerador en alta mar

gas externas, el sistema de fondeo o el tipo de estructura flotante. Parte de la consecución de estos objetivos son expuestos en el presente trabajo, mediante la presentación de las herramientas FASTLognoter y MorisonForm y su aplicación a la optimización de aerogeneradores "offshore". Hasta el momento el equipo de investigación ha puesto su atención en el desarrollo de estas herramientas y su difusión. (Gutiérrez et al. [5], [6])

2. Desarrollo de las herramientas FASTLognoter y MorisonForm

El principal objetivo del presente trabajo es la provisión de software de rápido prototipado que permita llevar a cabo un estudio de aerogeneradores "offshore"; es decir, la presentación de un conjunto de herramientas que permitan el análisis acoplado y la operación con FAST/AeroDyn/HydroDyn (Jonkman [7], Jonkman & Buhl [8], Laino & Hansen [9], Moriarty & Hansen [10]).

Para conseguir este objetivo es necesaria la búsqueda de una herramienta que permita llevar a cabo esta tarea; para ello ha sido escogida Lognoter (www.lognoter.com) como base de desarrollo de estas aplicaciones. Se trata de un software desarrollado por CompassIS (www.compassis.com), que permite un eficiente manejo de la información en el ámbito tecnológico. La principal ventaja de esta herramienta consiste en la facilidad para la creación de Interfaces Gráficas de Usuario, razón principal de la elección de esta herramienta. FASTLognoter; es una GUI que permite la fácil obtención de los archivos de entrada a FAST/AeroDyn/HydroDyn, el cálculo de aquellos parámetros previos para el desarrollo de un ajustado cálculo aeroelástico a través de los códigos desarrollados por NREL; su desarrollo será expuesto a lo largo del texto. Además, el acoplamiento con MorisonForm, permite tener una adecuada caracterización de aerogeneradores offshore. En resumen, esta nueva herramienta ha sido desarrollada con el ánimo

de la generación y la provisión de una interfaz que facilite el uso de FAST/AeroDyn/HydroDyn, permitiendo la optimización de aerogeneradores, con especial hincapié en aerogeneradores "offshore", a través del acoplamiento con el software MorisonForm, para el estudio de comportamiento dinámico de estructuras sometidas a la acción del oleaje, mediante la formulación dada por Morison y O'Brien.

Las principales características de este "set" de herramientas serán expuestas con detalle a lo largo del texto. En primer lugar, se presentan unas breves reseñas teóricas; a continuación, se exponen las principales características de ambas herramientas. El siguiente punto consiste en el estudio de los procedimientos para tener el análisis acoplado de aerogeneradores offshore. Posteriormente se muestran diversos estudios de optimización realizados a través de sendas herramientas, basados todos ellos en la turbina NREL 5 MW (Kooijman et al. [11], Lindenburg [12], Jonkman et al. [13]). El trabajo finaliza con la exposición de unas conclusiones junto con las actuales y futuras líneas de investigación en la materia desarrollado por el equipo de investigación.

2.1. Breve revisión sobre la teoría de Fast/aerodyn y MorisonForm

Cinco aspectos relevantes de la teoría básica que interviene en la modelización usada por los códigos FAST/AeroDyn a través de FASTLognoter y MorisonForm pueden destacarse: A) el cálculo de las deflexiones, B) la cinemática del aerogenerador; C) la cinética; D) los cálculos aerodinámicos y E) la modelización hidrodinámica.

Estos cinco aspectos son descritos de una manera resumida, intercambiando algunas de las nuevas capacidades aportadas por las herramientas desarrolladas, FASTLognoter y MorisonForm.

a) *Cálculo de las deflexiones.* Las rutinas de FAST emplean para modelización de aerogeneradores tanto elementos rígidos como flexibles. Así pues, torre y palas son consideradas como elementos flexibles del sistema de generación. Cada uno de estos elementos flexible se modelizan y representan mediante dos modos de deformación, expresados ambos mediante polinomios de sexto grado, como serán presentados posteriormente. Las deflexiones de torres son resultantes de la suma de los modos laterales (lado – lado) y longitudinales (popa – proa), asumiendo que ambos modos son independientes. De manera similar se tratan, los modos en el sentido del borde de ataque y de flap. En este sentido FASTLognoter permite obtener los coeficientes que conforma estos polinomios de sexto grado a través de varias herramientas dispuestas para este propósito. Por ejemplo, el pre-procesador denominado BModes (Bir [14]), que interactúa con el desarrollado por NREL y ofrece los modos y frecuencias propias de aquellas partes analizadas, conjugando en una única herramienta nuevas capacidades. Los modelos estructurales empleados consideran estas partes flexibles (torre y palas) como vigas en voladizo (Wilson [15], Ahlstrom [16]), con una distribución de masa y rigidez continua.

Si z denota la coordenada generalizada a lo largo de la viga y t denota el tiempo respectivamente, las deflexiones perpendiculares $u(\tilde{z}, t)$ de una viga deformada pueden obtenerse como la suma de los modos normales; por ejemplo mediante el método de Rayleigh – Ritz,

$$u(\tilde{z}, t) = \sum_{a=1}^N \varphi_a(\tilde{z}) \cdot q_a(t) \quad (1)$$

donde $\varphi_a(\tilde{z})$ se denomina función de Ritz, y siendo a es la deformación del modo específico de la viga ($1 < a < N$, con N un número apropiado de parámetros para determinar la deflexión de la viga en un tiempo dado t) y $q_a(t)$ resulta la coordenada generalizada relacionada con $\varphi_a(\tilde{z})$, siendo función del tiempo. Cada modo normal es

supuesto por FAST mediante un polinomio de sexto grado, cuyos coeficientes C_0, C_1, \dots, C_6 , son elegidos por el diseñador:

$$\varphi(\tilde{z}) = C_0 + C_1 \tilde{z} + C_2 \tilde{z}^2 + C_3 \tilde{z}^3 + C_4 \tilde{z}^4 + C_5 \tilde{z}^5 + C_6 \tilde{z}^6 \quad (2)$$

con $C_0 = C_1 = 0$ en este caso.

b) *Cálculos cinemáticos.* El código FAST emplea el teorema de adición de velocidades angulares para determinar la velocidad angular de las partes móviles dotadas con movimiento circular del sistema aerogenerador. Así pues, las velocidades axiales y angulares (v^x y ω^x , respectivamente) en cualquier punto X en un cierto sistema de referencia I , pueden expresarse (Wilson [15]):

$$v^x = \left(\sum_{i=1}^N v_i^x \dot{q}_i \right) + v_t^x \quad (3)$$

$$\omega^x = \left(\sum_{i=1}^N \omega_i^x \dot{q}_i \right) + \omega_t^x \quad (4)$$

siendo q_i los grados de libertad del cuerpo.

c) *Cálculos cinéticos.* Las ecuaciones de movimiento empleadas en las rutinas de FAST son derivadas de las ecuaciones de Kane [17] (derivadas a su vez de la segunda ley de Newton),

$$\vec{F}_p + \vec{F}_p^* = 0 \quad \text{para } p = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Siendo N el número de grados de libertad del sistema. En la Ecuación 5, \vec{F}_p son las fuerzas activas generalizadas actuando sobre la turbina eólica (incluyendo todas las fuerzas externas, tales como, las aerodinámicas, de gravedad...), mientras que \vec{F}_p^* son las fuerzas de inercia generalizadas que actúan sobre el sistema aerogenerador (incluyendo todos los efectos de aceleraciones lineales y angulares provocados por las masas).

d) *Aerodinámica.* FAST integra las rutinas de AeroDyn para determinar las cargas aerodinámicas sobre aerogeneradores. Cuando un usuario ejecuta FASTLognoter, se requieren determinados parámetros para determinar el cálculo de estas cargas, tales como la sustentación, el arrastre o los momentos de cabeceo a lo largo de la pala. A este respecto, FASTLognoter incorpora un preprocesador denominado AirFoil; que permite calcular todos los datos referentes a los perfiles aerodinámicos que componen las palas del aerogenerador. Además, FASTLognoter provee todos los datos necesarios para la ejecución de AeroDyn, como condiciones de viento, geometría de la turbina...

El código AeroDyn usa dos importantes modelos aerodinámicos para caracterizar las cargas de viento: la teoría del Elemento de Pala (en inglés Blade Element Momentum, BEM) y la teoría de Estela Dinámica Generalizada (en inglés Generalized Dynamic Wake, GDW). Centrándonos en la teoría del elemento de pala (de aquí en adelante BEM), esta teoría asume que la pala del aerogenerador está dividida en pequeños elementos bidimensionales, que actúan y operan aerodinámicamente independientes. Así, la pérdida de presión en el plano del rotor es causada por el trabajo realizado por el flujo que pasa a través de los elementos de pala en el plano del rotor. Esos elementos bidimensionales rotan en el plano del rotor, dibujando regiones anulares a través en las que se imponen un equilibrio de la cantidad de movimiento. Resumiendo, AeroDyn lleva a cabo el análisis aerodinámico en esas regiones anulares descritas por los elementos bidimensionales. La teoría BEM calcula el empuje en una región anular de ancho dr como,

$$dT = \frac{1}{2} B \rho_a U_{total}^2 (C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)) c dr \quad (6)$$

y el par causado por esos elementos como;

$$dQ = \frac{1}{2} B \rho_a U_{total}^2 (C_L \sin(\alpha) + C_D \cos(\alpha)) c dr \quad (7)$$

donde B es el número de palas, ρ_a es la densidad del aire, U_{total} es la velocidad en la sección del perfil aerodinámico (teniendo en cuenta la velocidad de rotación y la inducida), C_L y C_D son los coeficientes de arrastre y sustentación de la sección, α es el ángulo de ataque de la pala relativa al plano del rotor, c es la cuerda de la sección y r es el radio de rotor donde se calcula el par.

Para superar ciertas limitaciones de la teoría BEM, AeroDyn incorpora además ciertas correcciones y métodos que permiten tener en cuenta determinados aspectos como: pérdidas aerodinámicas en la punta de la pala, estelas, pérdidas en el núcleo o la torre, cálculos de pérdida dinámica de los perfiles aerodinámicos... haciendo los cálculos más precisos (Laino and Hansen [9], Moriarty and Hansen [10], Leishman and Beddoes [18]).

Por otro lado, AeroDyn también emplea la teoría de estela dinámica generalizada (de aquí en adelante GDW), basada en la solución potencial de la ecuación de Laplace, siendo la teoría GDW una extensión de los modelos de Pitt y Petters [19]. La principal ventaja de esta teoría es la inherente modelización de los efectos de estela y pérdidas en la punta de pala. Otra de las ventajas, es la determinación de las velocidades inducidas en el plano del rotor de un conjunto de ecuaciones no lineales. Sin embargo las suposiciones básicas empleadas por la teoría GDW llevan a inestabilidades en el método para bajas velocidades. Para solventar este problema AeroDyn emplea la teoría BEM cuando la velocidad del viento es inferior a 8 m/s (Laino and Hansen [9]).

e) *Hidrodinámica*. El paso de un fluido a través de elementos esbeltos se considera uno de los importantes problemas en hidrodinámica y sobre todo en ingeniería offshore. Las fuerzas ejercidas por las olas sobre cuerpos esbeltos en flujo viscoso no estacionario pueden ser determinadas a través de las ecuaciones de Morison [20],

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho_w C_D S \vec{v} |\vec{v}| + \rho_w C_M V_m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (8)$$

donde \vec{v} es la velocidad del fluido relativa al elemento, C_D y C_M son los coeficientes de arrastre y de inercia ρ_w es la densidad del agua, S es el área perpendicular a la dirección de la velocidad del fluido, V_m es el volumen de fluido desplazado y $d\vec{v}/dt$ es la aceleración del fluido.

Así, estas ecuaciones se emplean normalmente en la obtención de las solicitaciones sobre estructuras offshore. Por tanto, centrando la atención en la tecnología eólica offshore, además de FASTLognoter, se desarrolla la herramienta MorisonForm que permite un cálculo rápido y aproximado de las solicitaciones hidrodinámicas sobre la estructura que conforma la base de sustentación del aerogenerador offshore, siempre y cuando la plataforma del aerogenerador esté compuesta por elementos de tipo esbelto. Estas solicitaciones a las cuales está sometida la plataforma de una aerogenerador eólico marino flotante están compuestas mayoritariamente por tres componentes:

1.- Fuerzas de arrastre. Generadas por la componente normal de la velocidad del flujo. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad y la magnitud de la misma está dada por el denominado coeficiente de "arrastre" C_D , depende de la geometría del elemento esbelto.

2.- Fuerzas de inercia. Generadas por la componente normal a la aceleración del flujo. Estas fuerzas son directamente proporcionales a la aceleración del flujo. Estas fuerzas vienen en función el denominado coeficiente de inercia C_M , que depende de la masa añadida del elemento.

3.- Fuerzas de sustentación. Orientadas normales al vector velocidad y normales con el eje principal del elemento esbelto. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad y puede especificarse a través del coeficiente de sustentación C_L . Si los miembros de la estructura offshore son en su mayoría esbeltos (hecho que ocurre normalmente) esta componente de las solicitaciones no sería considerada.

Así pues, la fuerza total linearizada por unidad de longitud ejercida por olas de superficie sobre elementos esbeltos se calcula en la herramienta MorisonForm como,

$$F_{total} = \int_{z_{inf}}^{z_{sup}} \frac{1}{2} C_D \rho_w D (l \times a \times l) dz + C_M \rho_w S (l \times v \times l) |l \times v \times l| dz \quad (9)$$

Por otro lado, los momentos ejercidos por la acción del oleaje sobre la estructura, respecto al centro de gravedad de la estructura, puede ponerse por,

$$M_{total} = \int_{z_{inf}}^{z_{sup}} (z_{cog} - z) dF_{total} \quad (10)$$

En las expresiones anteriores, l es el vector columna de cosenos directores, v es la velocidad local del fluido, a es la aceleración local, D es el diámetro del elemento esbelto, S es la superficie transversal expuesta al flujo, z es la coordenada vertical medida desde la base de la estructura considerada, dz es una rebanada del cuerpo sumergido y z_{cog} es la posición vertical del centro de gravedad.

Existen ciertas limitaciones para lo expuesto anteriormente, ya que no se consideran ciertos efectos que pueden aparecer. Así, en estructuras flotantes cuyo diámetro es lo suficientemente pequeño en relación a la longitud de ola incidente (0.2 veces menor que la longitud de ola), los fenómenos de difracción pueden despreciarse. Sin embargo, cuando el diámetro del elemento sumergido es suficientemente grande la alteración en el campo de presiones, es lo bastante grande como para incluir los fenómenos de difracción en la correcta determinación de las fuerzas de presión local y global originadas por el oleaje. En esta ocasión, las ecuaciones de Morison no deberían utilizarse. Además, dichas ecuaciones consideran que la resistencia viscosa domina en las fuerzas viscosas y los efectos de radiación se ignoran. Estas expresiones, como se ha mencionado anteriormente son válidas para elementos esbeltos axil - simétricos, por lo que, no son aplicables a elementos no simétricos. También es importante tener en cuenta que los vectores de velocidad y aceleración rotan desfasados 90 grados uno respecto del otro en el plano xz, considerado en un sistema de referencia local situado en el centro de gravedad de la estructura flotante, con el eje z perpendicular a la flotación considerada. Todo esto hace que exista un grado de imprecisión en la determinación de las solicitaciones sobre la estructura del aerogenerador.

MorisonForm emplea en la determinación de las características cinemáticas del oleaje la teoría lineal de Airy (Faltinsen [19], Lewis [20]). Esta teoría considera que las olas de superficie pueden ser aproximadas mediante la superposición de olas regulares con perfil sinusoidal de pequeña amplitud. El potencial ϕ de velocidades puede ser expresarse como;

$$\phi = -\bar{\zeta} V_c \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh(kh)} \sin k(x - V_c t), \quad (11)$$

donde $\bar{\zeta}$ es la amplitud del oleaje, V_c es la celeridad del oleaje, x es la coordenada longitudinal, h es la profundidad, k es el número de onda

y t es el tiempo. Sin embargo, la aplicación del principio de superposición lleva a la pérdida de los efectos no – lineares.

2.2. Descripción del problema

La forma típica de la respuesta de una estructura flotante con una estructura rígida emplazada sobre ella (en el caso considerado un aerogenerador) y con seis grados de libertad (largada, deriva, arfada, guiñada, cabeceo y balance), sometida a oleaje regular sinusoidal (véase la Figura 2) puede ser escrita en el dominio de la frecuencia como:

$$\sum_{k=1}^6 (MP_{jk} + A_{jk}(\omega) + MA_{jk})\eta_k + (BP_{jk}(\omega) + BA_{jk})\dot{\eta}_k + (CP_{jk} + CSF_{jk} + CA_{jk})\eta = F_j \cdot e^{-i\omega t} \quad (12)$$

para $j = 1, \dots, 6$

donde MP_{jk} , $P_{jk}(\omega)$, MA_{jk} , $BP_{jk}(\omega)$, BA_{jk} , CP_{jk} , CSF_{jk} y CA_{jk} se corresponden con las matrices de masa de la plataforma, masas añadidas del sistema, masa de la turbina eólica, amortiguamiento de plataforma y turbina eólica y matrices de restauración hidrostática de la plataforma, del aerogenerador y de los sistemas de fondeo que compone el sistema. Todas ellas tienen dimensión 6×6 . Es preciso remarcar que el amortiguamiento ocasionado por el aerogenerador en la mayoría de los casos se despreciará por considerar que el empuje generado por el sistema aerogenerador es constante con el tiempo. Por otro lado, F_j son las amplitudes complejas de las fuerzas y momentos experimentadas por el cuerpo (Faltinsen, [21]; Tracy, [23]).

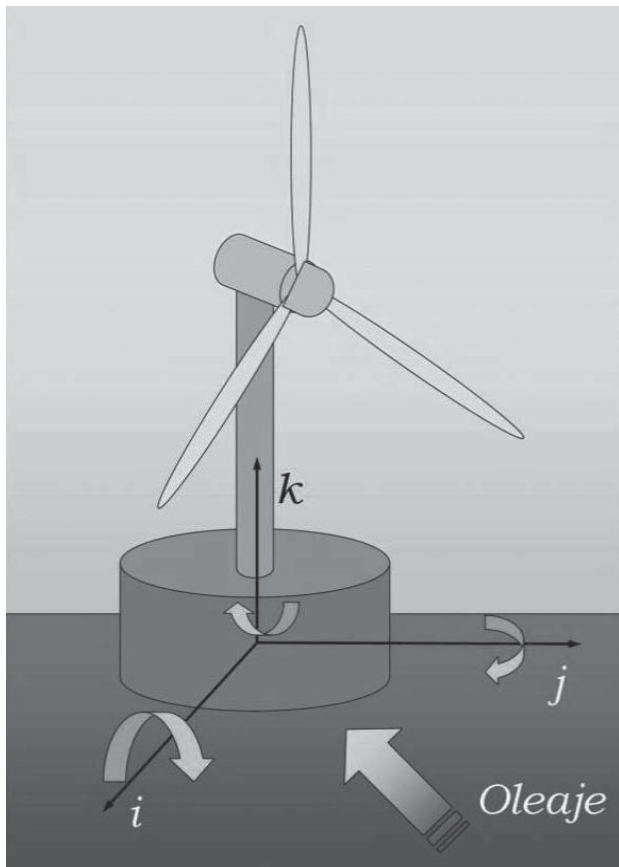


Figura 2: Grados de libertad de un aerogenerador marino flotante

La Ecuación 12 puede resolverse mediante la sustitución en el término de la izquierda por $\eta_k = \eta_k^* \cdot e^{-i\omega t}$. Esto nos lleva a un sistema de seis ecuaciones, algebraico y complejo, que puede ser resuelto por los métodos estándar empleados a tal fin. Siguiendo con lo anterior, esto queda expresado como:

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2 \cdot M_{jk} + i\omega B_{jk} + C_{jk}] \Xi = F_j, \quad \text{para } j = 1, \dots, 6, \quad (13)$$

donde ω es la frecuencia del oleaje incidente (oleaje regular), M_{jk} es la matriz de masa total del sistema, B_{jk} es la matriz de amortiguamiento total del sistema y C_{jk} es la matriz de restauración del sistema. Todas ellas se obtienen a partir de la suma de cada una de las matrices presentadas anteriormente.

Como bien es conocido, la función de transferencia Ξ (Operador de Respuesta en Amplitud, en inglés RAO, Response Amplitude Operator) es aquella que relaciona la respuesta de un sistema frente a la acción de una excitación, en función de la frecuencia para cada uno de los modos del sistema. En este caso frente a la acción de un oleaje con amplitud unitaria, se tiene que,

$$\Xi = \begin{Bmatrix} RAO_1(\omega) \\ RAO_2(\omega) \\ RAO_3(\omega) \\ RAO_4(\omega) \\ RAO_5(\omega) \\ RAO_6(\omega) \end{Bmatrix} = [-\omega^2 \cdot M_{total} + i\omega B_{total} + C_{total}]^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \xi_1(\omega) \\ \xi_2(\omega) \\ \xi_3(\omega) \\ \xi_4(\omega) \\ \xi_5(\omega) \\ \xi_6(\omega) \end{Bmatrix}, \quad \text{para } j = 1, \dots, 6 \quad (14)$$

De esta manera queda caracterizado el comportamiento de la estructura flotante en el dominio de la frecuencia frente a la acción dinámica de solicitaciones de oleaje y viento.

2.3. Características de FASTLognoter Y MorisonForm

En primer lugar se centrará la atención en FASTLognoter como herramienta optimizadora de la parte aerogeneradora. FASTLognoter tiene la capacidad de clasificar los diferentes tipos de proyectos, organizando la información y parametrizando el cálculo de aerogeneradores en función del archivo de entrada. En conexión con esto, FASTLognoter permite al usuario clasificar la información de acuerdo con los siguientes grupos establecidos dentro de la interfaz: torre, pala, plataforma, sistema de recogida de cola, linearización del sistema, aerodinámica y parámetros de salida. Esta ventaja facilita al usuario un rápido aprendizaje de las rutinas de NREL. Además, para facilitar y ayudar en el cálculo se incluyen recursos bibliográficos, vista adaptativa o ayuda dinámica, por ejemplo.

Par lograr el objetivo de un exhaustivo análisis de un aerogenerador, bien sea marino o terrestre, se requieren multitud de parámetros previos para llevar a cabo el cálculo aeroelástico con FAST/AeroDyn. Por este motivo, FASTLognoter incluye varios preprocesadores que permiten el cálculo de estos parámetros y que serán comentados brevemente en los siguientes párrafos. Tanto FASTLognoter como MorisonForm incluyen una base de datos SQLite que permite el manejo de cada uno de los proyectos almacenados fácilmente. Además, en el caso de FASTLognoter existe la posibilidad de realizar el análisis paramétrico de un aerogenerador tipo mediante un cálculo colectivo de los casos almacenados en la base de datos.

Otro aspecto distintivo de FASTLognoter es la inclusión de casos predefinidos basados en los test adjuntos a FAST/AeroDyn y los definidos para la turbina NREL 5 MW (Passon et al. [24], Vorpahl et al. [25], Jonkman [26]), lo que permite al usuario un rápido análisis mediante el empleo de estos casos ya definidos.

Los preprocesadores añadidos junto a FASTLognoter están directamente relacionados con determinados aspectos del aerogenerador: torre, palas, perfiles aerodinámicos y modos de deformación. Centrándonos en el palas y torre, junto a FASTLognoter se añaden los preprocesadores TowerProp y BladeProp. Ambos permiten calcular y editar las propiedades distribuidas de torre y pala, creando fácilmente archivos que se incorporan fácilmente a FASTLognoter, mediante archivos CSV (Comma Separated Values). Así, con respecto a la torre es posible la elección de diferentes tipos de materiales: hormigón, acero, PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio) y aluminio. La torre queda dividida en múltiples secciones con una distribución de

masa lineal y por tanto, aquellos otros parámetros relacionados con el área de la sección y tendrán también distribución lineal, como la rigidez proa-popa o lado-lado. Estas propiedades pueden expresarse como (Jonkman and Buhl [8]),

$$\begin{aligned} EI_{\text{proa-popa}} &= \iint E(x, y) x^2 dx dy \\ EI_{\text{lado-lado}} &= \iint E(x, y) y^2 dx dy \end{aligned} \quad (15)$$

donde x e y son las coordenadas desde la línea central de la turbina relacionados con el diferencial de área y $E(x, y)$ es el módulo de Young del material el cual está fabricada la torre.

En relación con las partes flexibles del aerogenerador, resulta de obligada mención que en todo análisis y estudio de un aeroelástico es necesario un estudio modal de estas partes flexibles; es decir, palas y torre. Por esta razón, FASTLognoter incorpora un par de preprocesadores que permiten obtener los modos propios de estas partes flexibles. Estos preprocesadores son denominados MiterWT y BModes, de acuerdo con el nombre del preprocesador desarrollado por NREL para tal propósito, BModes (Bir [14]). El preprocesador BModes usa una discretización de elementos finitos de las partes flexibles del aerogenerador para llevar a cabo el análisis de los modos acoplados de torre y pala. La existencia de modos acoplados implica la presencia de movimientos de flexión, axial y torsión acoplados dentro del modo de vibración libre. Puesto que FAST asume unos modos predefinidos para determinar el comportamiento de estas partes flexibles, se requiere el uso de BModes. La discusión referente a la formulación referente a BModes queda fuera del ámbito del presente trabajo aunque lógicamente existen numerosas referencias al efecto (Bir [14]).

En cuanto a MiterWT, se trata de otro preprocesador que permite calcular los modos acoplados mediante el método de iteración de matrices, llamado método de Stodola (Burton [1], Rao [27]). Este método consiste en la asunción de un modo de deformación adecuado a las características de la viga en estudio (torre o pala), calculando las cargas de inercia asociadas a este modo para una frecuencia de 1 rad/s. Este perfil obtenido posteriormente se normaliza mediante la división de la deflexión con la deflexión obtenida en la iteración anterior. Así, se repite hasta que la frecuencia propia converge y por tanto el modo de deformación.

$$\omega_i = \sqrt{\frac{y_n}{y_{n-1}}} \quad (17)$$

donde y es la deflexión en el extremo en la iteración n y ω es la frecuencia propia.

Centrando la atención en la aerodinámica de los perfiles que componen la pala del aerogenerador, junto a FASTLognoter ha sido añadido otro preprocesador denominado AirfoilPrep (Hansen [28]) y que permite obtener todas las características aerodinámicas de dichos perfiles. Este preprocesador usa las ecuaciones de Vítérna (Moriarty and Hansen [10]) para extender todos los parámetros del aerofoil desde un limitado número de medidas tomadas experimentalmente. Además permite calcular las pérdidas dinámicas usando el método semiempírico de Beddoes y Leishman [18]. Además permite interpolar valores de los coeficientes para otras localizaciones a lo largo de la pala. Este preprocesador usa además del método de Du para aumentar la sustentación del perfil; así como, el método de Egger's para modificar el arrastre (Du and Slig [29]).

En cuanto al software MorisonForm, el principal objetivo es el cálculo aproximado de la respuesta dinámica de estructuras flotantes marinas compuestas por elementos esbeltos. MorisonForm permite importar geometrías desde otros programas; tales como RamSeries

(software desarrollado por CompassIS para el análisis estructural mediante elementos finitos). Además, ofrece las curvas RAO, datos característicos de la estructura como inercias, posición geométrica del centro de flotación, matrices de restauración y de masa...

Para la mejora en el análisis dinámico de aerogeneradores offshore, es posible la modificación de los coeficientes C_M y C_D , mediante los propios valores calculados por el usuario. Esto permite tener en cuenta el efecto de las corrientes mediante la modificación de estos coeficientes (API rules [30]). También, puede obtener los valores de masa añadida y difracción, ambas función de la frecuencia en cada paso de integración. Otro aspecto importante, reside en la posibilidad de generación de archivos de entrada a HydroDyn, rutinas desarrolladas por NREL para el cálculo de la respuesta dinámica del conjunto plataforma-aerogenerador. Al igual que FASTLognoter, MorisonForm incorpora una base de datos SQLite que permite organizar los proyectos y organizar la información fácilmente. Todas estas virtudes son similares a FASTLognoter pues ambos están implementados sobre la plataforma Lognoter. Ambas herramientas están disponibles para su libre descarga en <http://www.lognoter.com/c/lognoterforms/index>.

3. Energía eólica offshore: un problema de acoplamiento dinámico

La tecnología eólica en alta mar constituye uno de los principales retos de la Ingeniería Naval, no sólo en España sino también a nivel mundial. La combinación de la aerodinámica, hidrodinámica y sistemas dinámicos de fondeo convierten a esta tecnología en un problema único, todavía no estudiado con suficiente detalle. Así, la combinación de estos problemas, convierte a la tecnología eólica en alta mar un problema altamente acoplado y dificultoso. Los grandes rotores usados (126 metros de diámetro en algunos casos), los movimientos de la plataforma o el uso de elementos no esbeltos en la estructura de soporte del sistema aerogenerador, han sido modelados tradicionalmente mediante técnicas que no ofrecen el grado de exactitud buscado para un análisis en detalle y pormenorizado (ecuaciones de Morison, métodos BEM, análisis estático de fondeo); pero que sí permiten un rápido prototipado del sistema y un conocimiento adecuado del comportamiento del mismo (Matha et al. [31]). Así, se requieren de técnicas avanzadas que permitan un modelado en detalle de la estructura y de su comportamiento. Este tipo de técnicas avanzadas las podemos encontrar en los CFD (Computational Fluid Dynamics), en los sistemas multi-cuerpo (MBS, Multi-body system), además, es preciso modelar fenómenos de desprendimientos de vórtices, hidrodinámicos de segundo orden, vibraciones de vórtice inducidas, estela, interacciones dinámicas...

El comportamiento de un sistema aerogenerador flotante marino y sometido a las sollicitaciones del mar y atmosféricas, puede describirse de la siguiente manera: el sistema habitualmente está emplazado en un parque junto a otros artefactos de idénticas características, la acción del viento sobre el rotor, por un lado, se transforma en energía eléctrica en el sistema de acoplamiento del rotor mediante la acción de un par y por otro lado, el viento genera un par escorante dinámico que hace que la estructura sea balanceada alrededor de la posición de su centro de gravedad (véase Figura 1). Además como resulta obvio, el viento no actúa de manera uniforme sobre la estructura, pues fenómenos de estela de unos aerogeneradores sobre otros, desprendimientos de vórtices, fenómenos de sombra de torre y góndola, turbulencias, efectos de capa límite sobre la superficie libre del mar... hacen de su simulación una complicada tarea. Además, esta acción del viento sobre el sistema aerogenerador flotante se traduce simultáneamente en una respuesta del mismo. Esta acción del viento se transmite a la plataforma al estar el sistema aerogenerador acoplado rígidamente a la misma. La plataforma de soporte del aerogenerador está sometida a su vez, a la acción del oleaje de superficie, corrientes

marinas, vibraciones de vórtices inducidas... Al igual que el sistema aerogenerador esta acción sobre la plataforma se traducirá en una respuesta, traducida en desplazamientos, giros... que serán transmitidos a las diferentes partes del sistema aerogenerador flotante (Figura 1). Además, todos estos sistemas están provistos de un sistema de fondeo que permite su estacionamiento y localización en un determinado punto en alta mar. Así, los desplazamientos de la plataforma serán traducidos en tensiones sobre estos sistemas de fondeo (compuestos mayoritariamente por cadenas o cabos) y a su vez devuelta sobre el resto de la estructura como solicitaciones (Figura 1). También ha de tenerse en cuenta la interacción de estos sistemas de fondeo con el fondo y con las corrientes marinas, que influirá sobre las solicitaciones en el sistema flotante y que serán devueltas a la plataforma y al generador. Todo ello hace de un sistema altamente acoplado que transmite solicitaciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones de una parte a otra del sistema en función de la acción exterior de viento, oleaje, corrientes...

El lector podrá hacerse una idea de la importancia que tienen las herramientas computacionales para llevar a cabo un análisis en detalle y la optimización de un sistema aerogenerador marino flotante.

3.1. Flujo de trabajo con FASTLognoter y MorisonForm

Una vez conocido la importancia y dificultad del problema, resulta importante establecer un procedimiento para estimar el comportamiento dinámico de este tipo de sistemas, mediante el empleo de las herramientas presentadas anteriormente.

Actualmente, es bien conocida la existencia de diferentes herramientas en el mercado que permiten realizar análisis de aerogeneradores marinos en el dominio del tiempo, tales como: SeaFEM, Bladed, HAWC2, ADAMS, ANSYS, Poseidon... Es importante remarcar que en las últimas versiones de FAST/AeroDyn han sido incorporadas nuevas series de rutinas denominadas HydroDyn, las cuales permiten realizar un análisis acoplado de este sistema complejo. HydroDyn puede simular multitud de efectos hidrodinámicos como restauración hidrostática, amortiguamientos, corrientes marinas. Además tiene en cuenta las contribuciones de masa añadida y efectos de difracción de oleaje.

Así, como bien se ha comentado en puntos anteriores, las herramientas presentadas en este trabajo constituyen un de software gratuito que permiten un rápido prototipado de aerogeneradores emplazados en alta mar, facilitando la integración de nuevos usuarios al campo de la ingeniería eólica marina.

Para poder llevar a cabo el análisis en el dominio de la frecuencia, resulta necesario el cálculo de las matrices que componen la ecuación que modela la dinámica del sistema.

Como primera etapa del proceso de modelado del artefacto aerogenerador marino flotante, se requiere la obtención de las matrices de masa, amortiguamiento dinámico y restauración del aerogenerador. En muchas ocasiones, este tipo de información resulta difícil de conocer, sólo disponible por parte del fabricante del aerogenerador, de ahí que se recurra a modelos ampliamente validados como el aerogenerador NREL de 5MW. Sin embargo, a este respecto, FASTLognoter permite calcular dichas matrices mediante la asimilación del aerogenerador a un sistema mecánico básico compuesto por masa, resorte y amortiguador.

El código FAST tiene la capacidad de extraer la representación linealizada del sistema aeroelástico completo. Esta característica de FAST viene dada a través del código SymDyn (Symbolics Dynamics) (Jonkman & Buhl [7]) orientada al control de turbinas de eje horizontal (HAWT - horizontal axis wind turbine).

El proceso de linearización del sistema consta de dos pasos: el primero la determinación de un punto de operación estacionario para después linearizar el sistema sobre este punto de operación.

Las rutinas de linearización pueden usarse para desarrollar modelos de primer linearizados del sistema aeroelástico no lineal. FAST expresa el sistema de ecuaciones no lineales como:

$$M(q, u, t)\ddot{q} + f(q, \dot{q}, u, u_d, t) = 0 \quad (14)$$

Es de notar que en la mayoría de las ocasiones el amortiguamiento dinámico del sistema aerogenerador se desprecia si se considera que éste suministra un empuje constante en el tiempo.

Una vez obtenidas dichas matrices, la siguiente etapa en el estudio dinámico de un aerogenerador flotante en alta mar, está constituida por la obtención de las matrices de masa añadida y amortiguación de la estructura flotante que sostiene el aerogenerador. En esta fase, el empleo de programas tales como WAMIT (Lee [30]), que ofrecen las curvas de masa añadida y amortiguamiento del sistema función de la frecuencia, resulta imprescindible, para llevar a cabo el análisis del sistema. Estas curvas de amortiguamiento dinámico y masas añadidas serán entradas a MorisonForm, para determinar así el Operador de Amplitud de Respuesta del sistema.

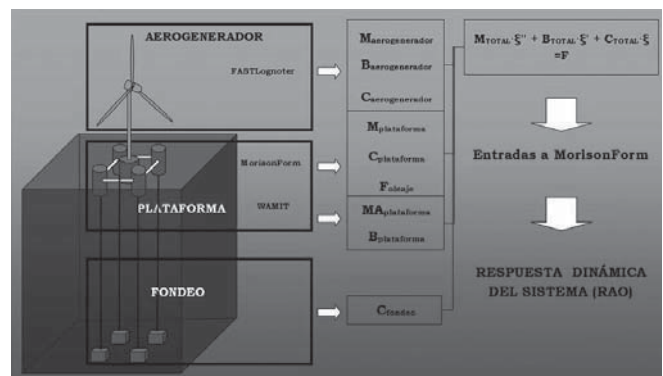


Figura 3: Análisis acoplado mediante MorisonForm y FASTLognoter

Otro aspecto a considerar en el análisis es la componente restauradora del sistema causada por los sistemas de fondeo asociados al aerogenerador en aguas profundas. Actualmente, una de las líneas de trabajo está centrada en el diseño y desarrollo de rutinas y herramientas que permitan obtener las matrices restauradoras del fondeo. Así, en nuestro caso tendrán que ser calculadas de manera directa empleando la formulación adecuada. Sin embargo, existen herramientas disponibles que permiten modelizar los sistemas de fondeo existentes mediante modelos de cable cuasi – estáticos o dinámicos. Podemos destacar dentro de este tipo de herramientas: OrcaFlex, software comercial que modela la respuesta dinámica del cable mediante elementos finitos y que permite el acoplamiento con el código FAST, mediante FASTlink, módulo de acoplamiento para obtener simulaciones completas en aerogeneradores offshore; ProteusDS, simulador de la dinámica de los sistemas de fondeo compuestos por cables desarrollado por la Universidad de Victoria en colaboración con Dynamic System Analysis Ltd.; o SIMO/RIFLEX, el cual modeliza el fondeo mediante elementos finitos con rigidez extensional.

La suma de los resultados obtenidos de las etapas precedentes servirá como entrada a MorisonForm, que calculará las matrices de masa de la plataforma, restauración hidrostática y solicitaciones del sistema mediante el empleo de la formulación de Morison y O'Brien para cada frecuencia del sistema de olas incidente. Quedará entonces planteado el sistema dinámico que será resuelto por el programa, ofreciendo como resultado las curvas del Operador de Amplitud de Respuesta del sistema (RAO), frecuencias propias de la estructura y características del oleaje.

En la siguiente sección se presenta la aplicación de las herramientas presentadas a la optimización de un aerogenerador offshore basado en el modelo NREL 5 MW.

4. Un caso de aplicación: optimización de un aerogenerador marino flotante

En esta sección, se muestran las principales capacidades de FASTLognoter a través del análisis de optimización de un aerogenerador offshore. En este caso se presenta la mejora en el comportamiento de las palas y torre de un aerogenerador en alta mar, teniendo como función objetivo la reducción de masa de la estructura rígida sostenida por la plataforma flotante, así como la selección de la plataforma flotante de un conjunto de tipologías y su posterior acoplamiento con los sistemas de fondeo y aerogenerador. Para lograr este objetivo se propone como punto de partida la optimización del aerogenerador offshore NREL 5 MW (Jonkman et al. [13]) como base del estudio. Se analizan cuatro palas con las mismas propiedades aerodinámicas pero diferentes propiedades mecánicas, dos tipologías de torre con diferentes propiedades mecánicas son analizadas junto con el análisis de la respuesta dinámica de dos tipologías de plataformas offshore: boya Spar (concepto OC3), semi-sumergible 1 (concepto OC4).

4.1. Optimización con FASTLognoter

El proceso de optimización con FASTLognoter se describe de manera esquemática en la Figura 4. Obviamente, la decisiones finales en cuanto al diseño tendrán que tener en cuenta múltiples consideraciones relativas al costo de la instalación, problemas de fabricación, transporte a la localización de la instalación, impacto visual... Sin embargo, las herramientas presentadas permiten llevar a cabo al usuario de las mismas un análisis sistemático de diferentes tipologías que facilitarán el camino en la selección de las tipologías de los diferentes tipos de aerogeneradores marinos.

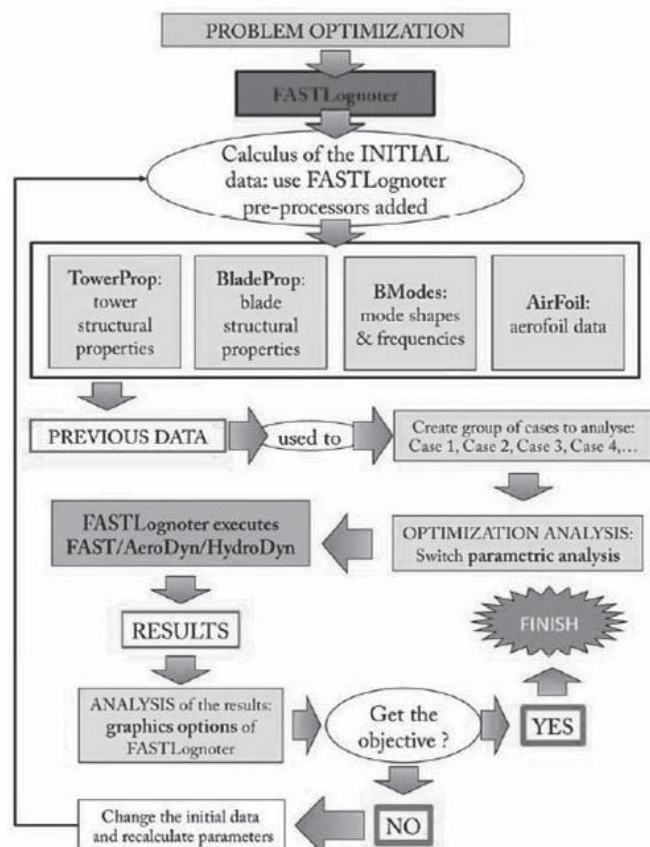


Figura 4: Esquema del proceso de optimización con FASTLognoter

En el análisis de la parte aerogeneradora, se establecen cuatro tipologías de pala diferentes:

- Pala 1. Corresponde a la pala base NREL 5 MW, fabricada en Poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Pala 2. Igual que la pala 1, pero fabricada en fibra de Carbono.
- Pala 3. Igual que la pala 1, pero fabricada en Aramida.
- Pala 4. Igual que la pala 1, pero con un incremento en espesor del 25 %.

Las propiedades de estas palas se presentan en la Figura 5, donde se muestran las propiedades de rigidez en el sentido del flap y en la dirección del borde de ataque.

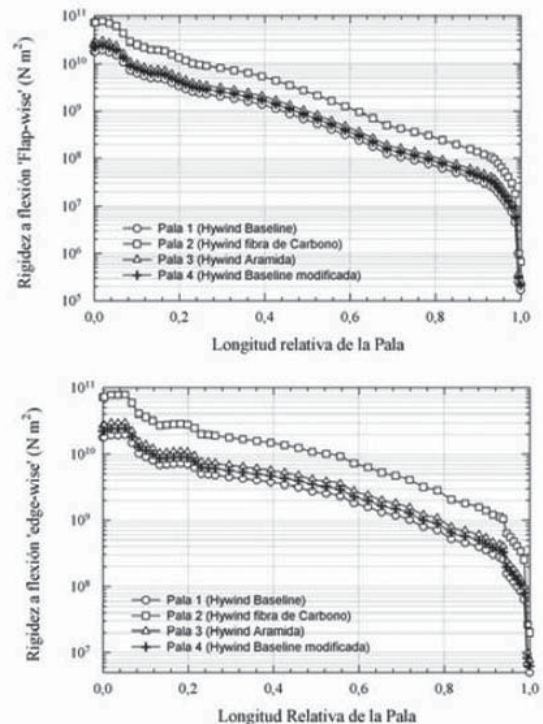


Figura 5: Distribución de rigidez en las palas propuestas de pala en el análisis

En cuanto a la torre del aerogenerador, se analizan dos propuestas; la primera de ellas está basada en la torre NREL – 5MW, mientras que en la segunda, manteniendo las proporciones del diámetro exterior de la torre y altura, se analizará un cambio en el material de la torre manteniendo las mismas características en cuanto a comportamiento a flexión y rigidez. Esto es,

- Torre 1. Corresponde con la torre NREL 5 MW, fabricada en acero.
- Torre 2. Igual que la torre 1, pero realizada en Poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Las propiedades de masa de las propuestas referentes a la torre, fabricadas en PRFV, son expuestas en la Figura 6.

El objetivo primario de esta fase es una reducción de masa de la parte superior del sistema completo del aerogenerador, que redundará en una mayor estabilidad del sistema siempre que las propiedades de la plataforma no varíen, ya que la posición global del centro de gravedad del sistema bajará en su conjunto, llevando por tanto a un mayor par restaurador de la plataforma frente a la acción del par escorante generado por la acción del viento actuando sobre el sistema. Esta estabilidad del aerogenerador marino está directamente relacionada con el coeficiente C55 de la matriz restauradora del sistema y que permite salvar determinadas limitaciones y condiciones operacionales, algunas de ellas expresadas en la Tabla 1. Es preciso remarcar, que

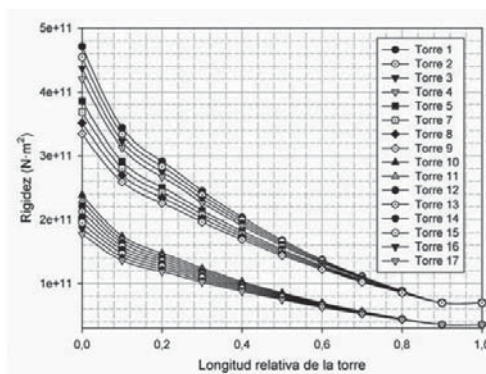


Figura 6: Distribución de rigidez en las propuestas de torre en el análisis

este coeficiente restaurador sólo es aplicable a estructuras cuyo fondeo sea de tipo línea catenaria, pues si las líneas de fondeo son mediante líneas tirantes este coeficiente C_{55} tenderá a infinito.

Tabla 1:

Limitaciones en el par restaurador del aerogenerador flotante marino

Limitaciones	Requisitos
Estabilidad de remolque	$(C_{55})_{total \text{ sin fondeo}} \geq M_{operativo}$
Estabilidad operacional	$(C_{55})_{total} \geq M_{aerogenerador}$

Tabla 1: Limitaciones en el par restaurador del aerogenerador flotante marino

Como es de esperar la Pala 4, posee una mayor peso que el resto de palas, mientras que la Pala 2 posee unas mejores propiedades mecánicas. El comportamiento de estas palas ha sido estudiado para velocidades comprendidas entre 1 y 25 m/s con flujo axial, siguiendo las recomendaciones dadas por los procedimientos de la International Electrotechnical Commission (61400-1, Wind turbine generator systems). Además, cada pala ha sido dividida en 17 nodos y sus características mecánicas se presentan por unidad de longitud. En cuanto a la torre, esta se ha dividido en 10 secciones con una distribución lineal de masa y rigidez desde la base hasta su conexión con la góndola.

Para poder llevar a cabo el estudio de optimización de estas partes del aerogenerador, es preciso emplear previamente los preprocesadores dispuestos a tal fin junto a FASTLognoter. En primer lugar, resulta necesario definir las propiedades mecánicas de torre y palas, empleando TowerProp y BladeProp respectivamente. Una vez definidas estas propiedades, se requiere un análisis modal de todas las tipologías analizadas. Como bien se ha comentado anteriormente, FASTLognoter dispone de dos preprocesadores destinados a tal fin, BModes y

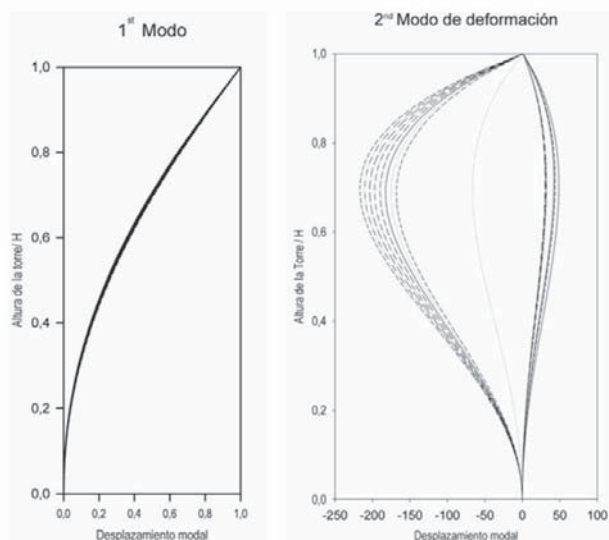


Figura 7: Modos de deformación de la torre

MiterWT, los cuales permiten obtener estos modos acoplados de torre y pala.

En la Figura 7, se presentan los modos acoplados 'babor – estribor' y 'proa – popa', de las diferentes propuestas de torre fabricadas en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Determinados los modos propios de la estructura, FASTLognoter creará los archivos de torre y pala para cada uno de los casos a analizar. Para ello, se requiere establecer una nueva entrada a la base de datos SQLite de FASTLognoter. Se establecerán tantas estradas como casos a analizar. Cuando todos estos casos han sido preparados, es suficiente con establecer la opción de análisis paramétrico de FASTLognoter para llevar a cabo el análisis de todos los casos establecidos. Los resultados de los análisis son presentados en la Figura 8 donde se presentan las deflexiones en el sentido del flap (Figura 8a) y del borde de las palas analizadas (Figura 8b).

Una vez optimizada aquellas partes del aerogenerador especificadas por el usuario, el siguiente paso en el estudio acoplado del sistema será la definición de las matrices de masa, amortiguamiento y restauración del aerogenerador. Para ello, se empleará la herramienta de linealización del sistema que posee FASTLognoter y que permitirá extraer estas matrices del aerogenerador, que serán usadas como entradas al software MorisonForm.

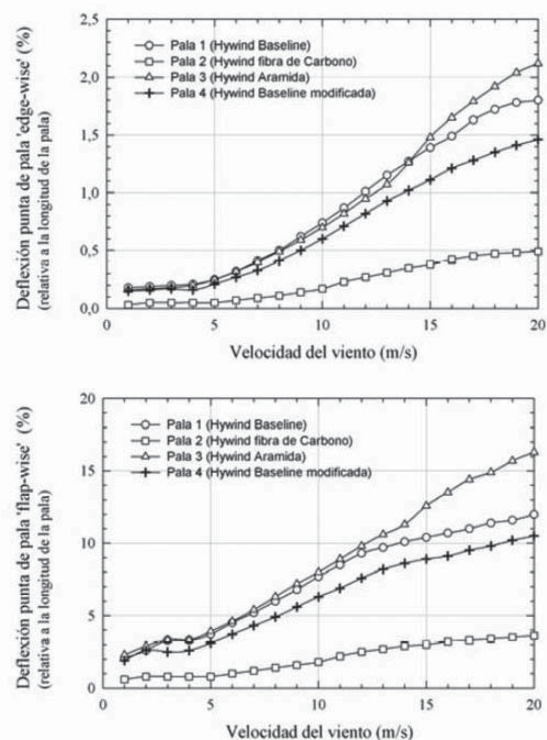


Figura 8: Representación de los resultados obtenidos para las palas analizadas para la deflexión en función de la velocidad del viento

En la Figura 8, puede observarse claramente la mejora en el comportamiento de la pala mediante el empleo de fibra de carbono, como elemento constructivo. Además, el ahorro en peso alcanzado estará situado en el 23,5 % del peso total de las palas, con la mejora evidente de las deflexiones y la clara entre torre y pala. Se ha comprobado también la disminución de la clara (espaciamento) entre torre y pala.

En cuanto a la torre, el empleo de poliéster con fibra de vidrio proporciona una reducción en el peso en torno al 45,2 %, manteniendo el mismo comportamiento en cuanto desplazamientos, velocidades y aceleraciones en el extremo de la misma y considerando además un factor de seguridad de 1,5 en cuanto a la masa de la torre. Puede

comprobarse en la Figura 9 la comparativa entre la torre construida en PRFV y la propuesta por NREL para la turbina de 5 MW de potencia. Se observa claramente la mejora en peso mientras las propiedades de rigidez de la torre son mantenidas. Esto resulta especialmente importante, pues excesivas aceleraciones podrán dañar los sistemas integrados dentro de las góndolas del aerogenerador. Sin embargo, el uso o no de este material, dependerá de otros condicionantes de diseño como precio, transporte construcción y otros aspectos que no son tenidos en cuenta en este análisis.

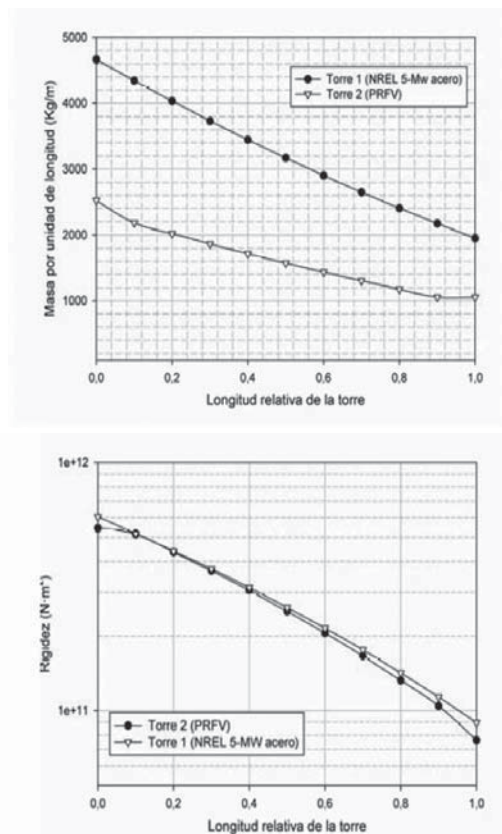


Figura 9: Comparativa de torre PRFV con torre NREL 5-MW

Finalmente, como resultado de la aplicación de FASTLognoter al aerogenerador NREL 5 – MW se obtiene una reducción en el peso total de la estructura estimado en aproximadamente 29,9 %, logrando así, el objetivo previsto. Esto puede observarse claramente en la Tabla 2.

Tabla 2:
Tabla 2: Masas (en Kg.) de las torres comparadas

	Torre NREL 5 MW	Torre PRFV Propuesta
Palas	53220.3	35391.5
Torre	347460.0	156888.3
Góndola	240000.0	240000.0
Núcleo	56780.0	56780.0
Masa total	697460.3	489059.8

Tabla 2: Masas (en Kg.) de las torres comparadas

Esta reducción de peso de la parte alta de la estructura dará como resultado una mayor estabilidad del sistema, como bien se ha comentado anteriormente. Además, reducir el peso de la estructura tendrá como consecuencia mejores condiciones en el transporte a igualdad de volumen transportado.

4.2. Análisis con MorisonForm

Una vez realizado el análisis exhaustivo del aerogenerador, la siguiente etapa en el análisis acoplado será el estudio frente a la acción del oleaje. Resultado del proceso anterior son las matrices de masa,

amortiguamiento y rigidez que serán incorporadas al sistema dinámico.

En el caso considerado y con las herramientas desarrolladas, hay que recordar que la respuesta del aerogenerador será obtenida frente a la acción del oleaje regular. MorisonForm no incorpora algoritmos para la determinación de la RAO en estados de mar irregulares.

Actualmente el creciente interés por la energía eólica en alta mar ha dado como consecuencia numerosos conceptos en aerogeneradores marinos. Así, diferentes soluciones han sido adoptadas como solución para sistemas eólicos en aguas de gran profundidad. Es posible establecer cuatro tipologías básicas en este ámbito de la tecnología (Jonkman & Buh [32]; Twidell & Gaudiosi [34]): de tipo barcaza, de tipo semisumergible, de tipo boya Spar y de tipo TLP (del inglés Tension Leg Platform) o tirantes tensionados (véase la Figura 10).

Barcaza. Se trata de una estructura flotante con poco calado y gran área de la flotación. Los sistemas de fondeo en este tipo de estructuras proveen el estacionamiento en alta mar. Además, los momentos adrizantes son provistos por su gran área de flotación.

Boya Spar. Es una estructura compuesta por un gran cilindro lastrado con su centro de gravedad en una posición muy baja. Al igual que el caso anterior su estacionamiento en alta mar viene dado por los sistemas de fondeo provistos en la estructura. Estas estructuras son intrínsecamente estables al disponer de un centro de gravedad tan bajo.

Semi-sumergible. Este tipo de flotador, está compuesto habitualmente por tres cilindros unidos. En este caso los sistemas de fondeo también proveen el estacionamiento en alta mar. La recuperación hidrostática de estos sistemas frente a la acción de solicitaciones vendrá dada por la distribución radial del área de flotación de los cilindros.

TLP: estructura flotante compuesta por un cilindro provisto de espolones a los cuales se unen los sistemas de fondeo de la estructura, haciendo en la mayoría de los casos altamente estable y limitando gran parte de los movimientos. Presenta además un mejor comportamiento angular, con menores amplitudes.

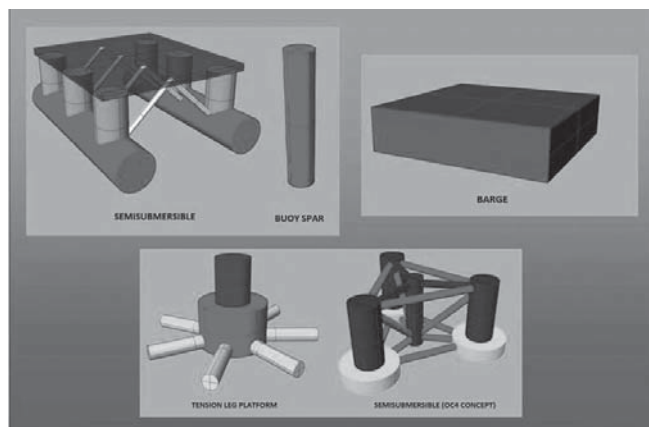


Figura 10: Tipologías de plataformas empleadas como sustentación de aerogeneradores en aguas profundas

Hoy día también es posible encontrar variaciones de estas estructuras, que permiten ampliar las posibilidades de estas cuatro tipologías apuntadas anteriormente. Por ejemplo, podemos encontrar estructuras TLP combinadas con boyas Spar como la propuesta por Karimirad (Karimirad et al., [35]), el concepto Sway (Holmas & Amdahl, [36]) el concepto WindFloat (Rodder et al., [37]) o el proyecto WindSea (<http://windsea.no>). alguna de estas tipologías serán analizadas mediante el empleo de MorisonForm.

Las tipologías analizadas en este trabajo son la boya Spar (Jonkman [26]) y la plataforma semisumergible OC4 (<http://www.ieawind.org/>). Ambas plataformas constituyen dos conceptos diferentes en el ámbito de la tecnología eólica offshore. Las características de estas plataformas se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3:
Características de las plataformas analizadas

	Spar OC3	Semi-sumergible OC4	Unidades
Calado	120,0	24,0	m
Longitud característica	9,4	47,5	m
Desplazamiento	7.294	13.917,0	m ³
Centro de gravedad (bajo S.L)	89,9155	14,4	m
Momento de inercia en Balance (eje X)	4,229 E+9	7,686 E+9	Kg·m ²
Momento de inercia en Cabeceo (eje Y)	4,229 E+9	8,335 E+9	Kg·m ²
Momento de inercia en Guiñada (eje Z)	1,642 E+8	1,391 E+10	Kg·m ²

Tabla 3: Características de las plataformas analizadas

Las características de cada una de estas plataformas son introducidas al programa, así como otros parámetros tales como, corrientes, características del oleaje, intervalo de análisis, geometría, intervalos de integración...

Además, para realizar un análisis exhaustivo y fiable, se requieren las curvas de masa añadida y amortiguamiento, función de la frecuencia. Estas curvas se obtienen por medio de programas como WAMIT (Lee [32]) e incorporadas a MorisonForm como tablas, que posteriormente serán leídas por la herramienta e incorporadas en cada intervalo de análisis (véase las Figuras 11 y 12). Actualmente, se trabaja en el desarrollo de programación para incorporar estas funciones a Morison-

Form. El programa interpolará los valores de las curvas para cada uno de los valores dados.

Se requiere también, la adición de ciertos valores de amortiguamiento dinámico, puesto que la modelización de las solicitaciones de la estructura viene descrita mediante un modelo lineal (Sclavounos [38]).

Finalmente, dependiendo del tipo de instalación flotante se requiere el cálculo de los componentes restauradores del sistema originados por la acción del fondeo. En este aspecto del análisis, al igual que en determinados aspectos mencionados anteriormente, existe una línea de trabajo relacionada con el desarrollo de herramientas que permitan calcular el comportamiento del fondeo frente a la acción de corrientes y oleaje.

Sin embargo, la aportación de los elementos de fondeo al sistema, tienen que calcularse directamente mediante la formulación usada habitualmente (Faltinsen [21], Sclavounos [38]) A continuación se expone de forma breve la formulación empleada.

La formulación clásica en el análisis de sistemas de fondeo emplea modelos estáticos para obtener las tensiones en los sistemas formados por catenarias;

$$T = T_H + \omega h + (\omega + \rho g A)z, \quad (15)$$

$$T_z = \omega s, \quad (16)$$

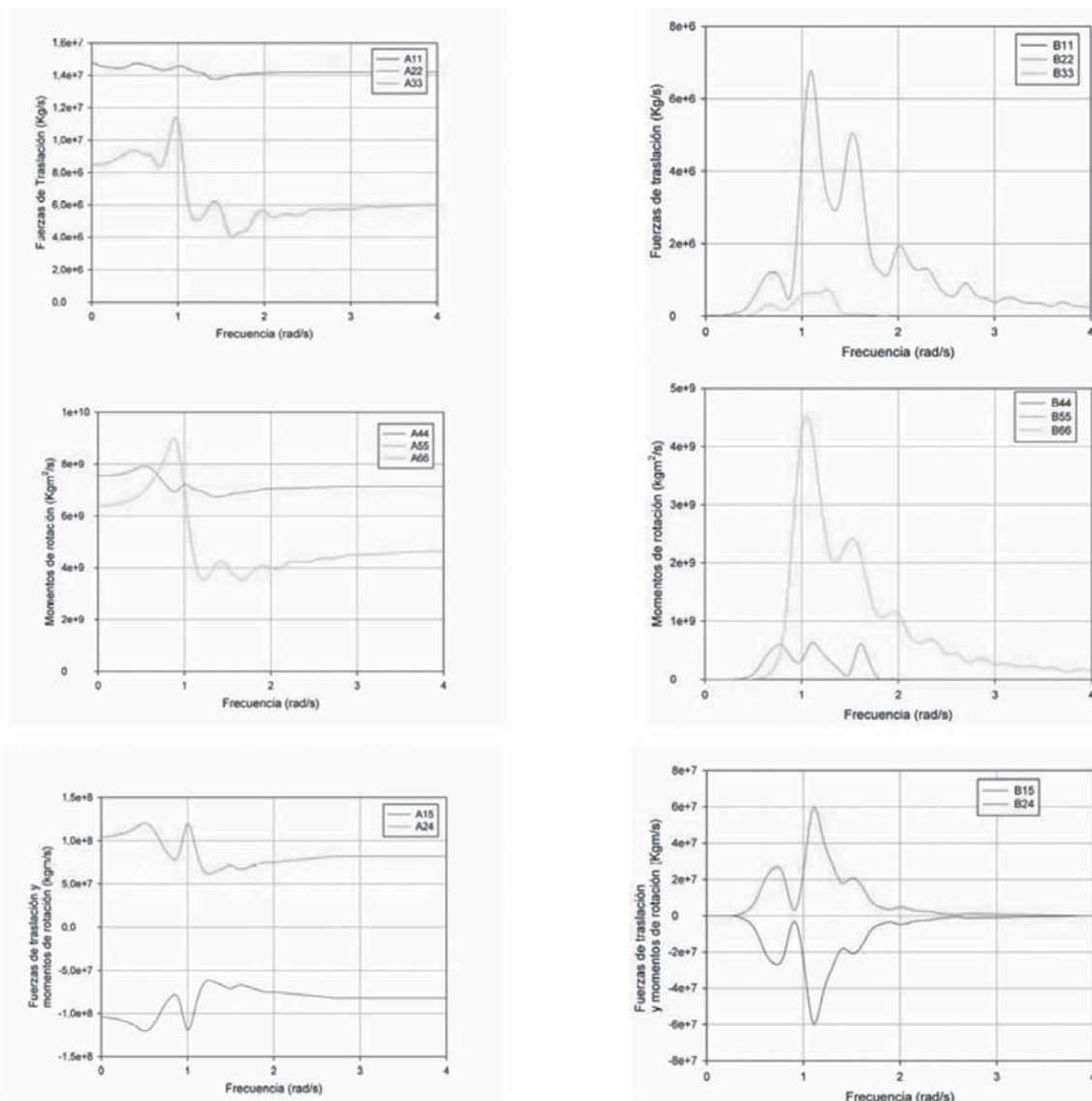


Figura 11: Curvas de masa añadida y amortiguamiento (Plataforma OC3)

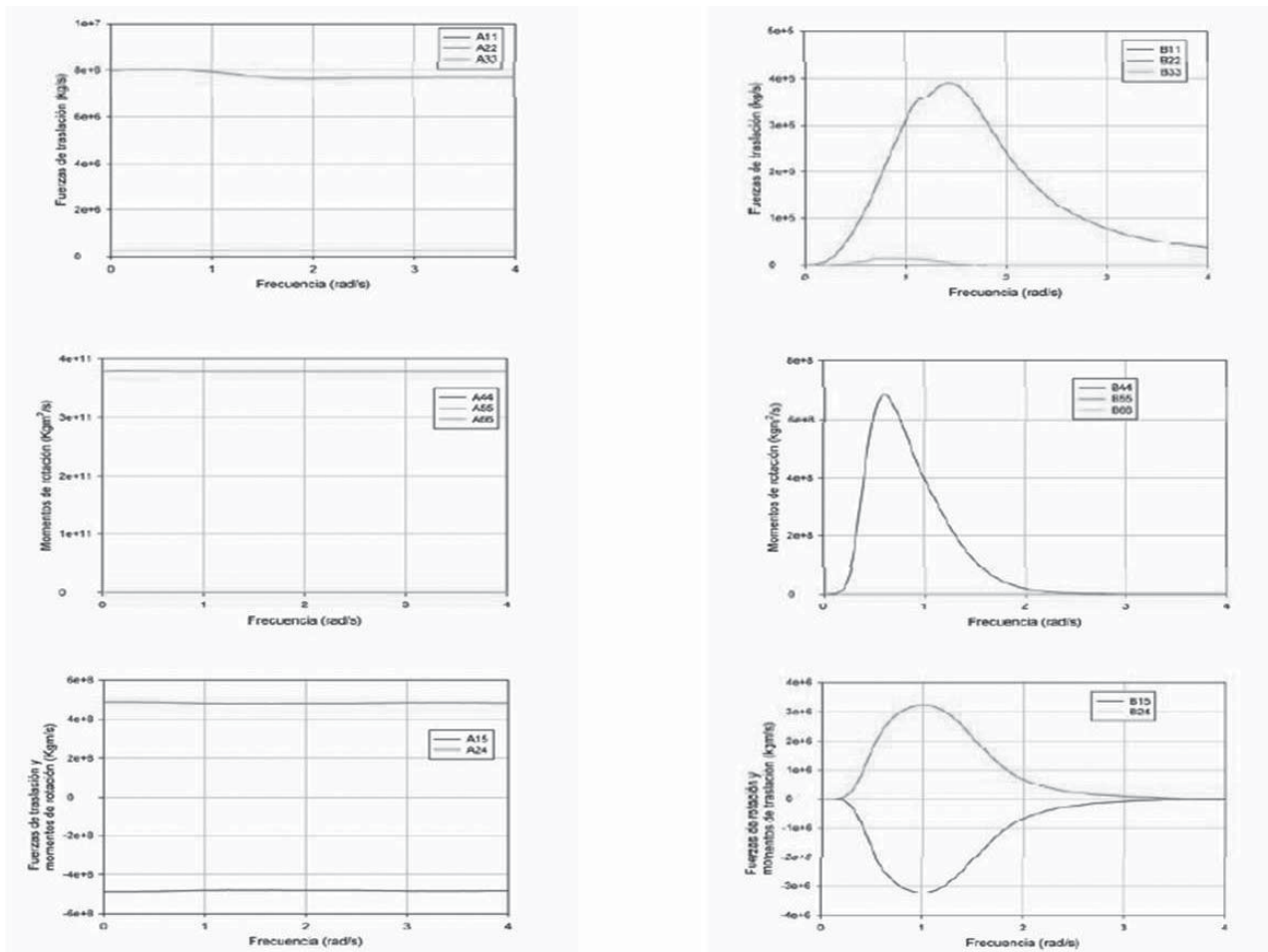


Figura 12: Curvas de masa añadida y amortiguamiento (Plataforma OC4)

donde T es la tensión a lo largo del cable, ω es el peso por metro de la línea de fondeo, A es la sección de la línea, ρ es la densidad del agua, g es la gravedad, z es la profundidad, T_z es la componente vertical de la tensión del cable y s es la longitud de la línea.

Sin embargo, la tendencia actual es hacia la implementación de algoritmos cuasi-estáticos o sistemas multi-cuerpo que aportan una mayor precisión al cálculo. Además, la mayoría de los sistemas de fondeo están provistos por más de una línea. La relación entre las cargas externas sobre el artefacto y su posición pueden ser consideradas de manera independiente para cada línea del sistema (véase la Figura 13). Así pues, las fuerzas horizontales F_1 y F_2 sobre el sistema y el momento de guiñada M_6 sobre las líneas pueden escribirse como:

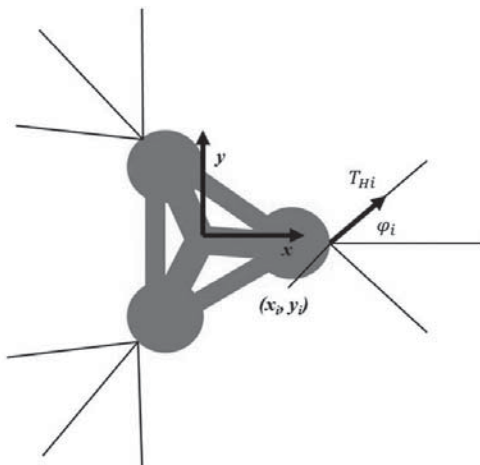


Figura 13: Ejemplo de fondeo diseminado en una plataforma semi-sumergible

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum_{i=1}^n T_{Hi} \cos(\varphi_i), \\ F_2 &= \sum_{i=1}^n T_{Hi} \sin(\varphi_i), \\ M_6 &= \sum_{i=1}^n T_{Hi} [x_i \sin(\varphi_i) - y_i \cos(\varphi_i)], \end{aligned} \quad (17)$$

donde T_{Hi} es la componente horizontal de la tensión en cada línea i , y φ es el ángulo que forma la línea i con el sistema de referencia definido.

La contribución de los efectos restauradores de las líneas de fondeo puede ser expresada como la suma de las contribuciones de cada línea [referencias]:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \sum_{i=1}^n k_i \cos^2(\varphi_i), \\ C_{22} &= \sum_{i=1}^n k_i \sin^2(\varphi_i), \\ C_{66} &= \sum_{i=1}^n k_i (x_i \sin(\varphi_i) - y_i \cos(\varphi_i))^2, \\ C_{26} = C_{62} &= \sum_{i=1}^n k_i (x_i \sin(\varphi_i) - y_i \cos(\varphi_i)) \sin(\varphi_i). \end{aligned} \quad (18)$$

donde k_i es el coeficiente restaurador de la línea i . Es preciso remarcar que si la estructura es simétrica con respecto al plano xz los coeficientes C_{16} , C_{12} , C_{21} y C_{61} son cero.

En ambas plataformas el número de líneas empleadas es de tres, siendo estas de tipo catenaria. Por lo tanto, las matrices de restauración pueden ponerse como sigue

$$\begin{bmatrix}
 7,09 \text{ e4 N/m} & 0 & 0 & 0 & -1,08\text{e5 Nm/m} & 0 \\
 0 & 7,09 \text{ e4 N/m} & 0 & 1,08\text{e5 Nm/m} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 7,09 \text{ e4 N/m} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1,08\text{e5 Nm/m} & 0 & 8,37 \text{ e7 Nm/rad} & 0 & 0 \\
 -1,08\text{e5 Nm/m} & 0 & 0 & 0 & 8,37 \text{ e7 Nm/rad} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11,70 \text{ e8 Nm/rad}
 \end{bmatrix}$$

Matriz de restauración Plataforma OC4

$$\begin{bmatrix}
 4,118 \text{ e4 N/m} & 0 & 0 & 0 & -2,821 \text{ e6 Nm/m} & 0 \\
 0 & 4,118 \text{ e4 N/m} & 0 & 2,821 \text{ e6 Nm/m} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1,194 \text{ e4 N/m} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 2,816 \text{ e6 Nm/m} & 0 & 3,111 \text{ e8 Nm/rad} & 0 & 0 \\
 -2,816 \text{ e6 Nm/m} & 0 & 0 & 0 & 3,111 \text{ e8 Nm/rad} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,156 \text{ e7 Nm/rad}
 \end{bmatrix}$$

Matriz de restauración Plataforma OC3

Determinados, todos los componentes de masa, de restauración y de amortiguación del sistema se realiza el análisis del sistema complejo. Los primeros resultados a tener en cuenta son las frecuencias propias asociadas al sistema rígido global, las cuales vienen expresadas por:

$$\omega_{n_i} = \sqrt{\frac{M_{total(ij)}}{C_{total(ij)}}} \quad \text{siendo } i = j \quad \text{para } i = 1, \dots, 6. \quad (19)$$

El conocimiento de las frecuencias propias del sistema ayuda en el diseño de sistema frente a la acción de las solicitaciones del oleaje, evitando fenómenos de resonancia que pueden dar lugar a ruptura de elementos de fondeo, daño de equipos situados en la parte alta del aerogenerador, altas aceleraciones o pérdida del sistema frente a la actuación del viento y el oleaje. Para cada uno de los sistemas analizados el resultado viene expresado en la Tabla 4.

Tabla 4:
Frecuencias propias (en s⁻¹) de las plataformas analizadas

	Spar OC3	Semi-sumergible OC4
Largada (Surge)	0.07101	0.06883
Deriva (Sway)	0.05050	0.04876
Arfada (Heave)	0.20285	0.55808
Balance (Roll)	0.83938	0.20142
Cabeceo (Pitch)	0.11876	0.13946
Guiñada (Yaw)	0.15938	0.07270

Tabla 4: Frecuencias propias (en s⁻¹) de las plataformas analizadas

Una vez conocidas las frecuencias propias del sistema es preciso presentar las curvas de respuesta dinámica función de la frecuencia. Obviamente decisiones en cuanto a la elección de una u otro tipo de plataforma dependerá de otros parámetros tales como: operatividad, facilidad de construcción, transporte mantenimiento, impacto ambiental, normativa al respecto...

Conocidas las curvas de respuesta dinámica del sistema aerogenerador flotante, es posible la obtención de determinadas características relacionadas con el comportamiento del artefacto en mares aleatorios como los valores significativos para cada uno de los grados de libertad. Ello es posible mediante el empleo de funciones de densidad espectral para oleaje (Faltinsen [21], Wayman [39], Withee [40]), como el de ITTC (International Towing Tank Conference) o JONSWAP, dependiendo de la ubicación del aerogenerador marino, así pues:

$$\sigma_i^2 = \int_0^\infty RAO_i^2(\omega) \cdot S(\omega) \cdot d\omega, \quad (20)$$

donde σ_i^2 es el valor medio cuadrático (RMS, Root Mean Square) y $S(\omega)$ es la función de densidad espectral, cuya expresión variará en función de la ubicación elegida para el emplazamiento del aerogenerador marino.

4.3. Limitaciones en el diseño de aerogeneradores offshore

En el diseño de aerogeneradores offshore es necesario asegurarse la correcta operatividad del sistema por ello es necesario imponer ciertas limitaciones que aseguren el correcto funcionamiento del aerogenerador flotante marino. Estas limitaciones, relacionadas fundamentalmente con la estabilidad, las podemos clasificar en:

- Estabilidad en remolque
- Estabilidad operativa
- Cabeceo dinámico
- Tensión máxima de las líneas de fondeo
- Slamming

Estabilidad de remolque. Este concepto es aplicado a aquellos tipos de aerogeneradores flotantes cuya plataforma sustentadora es de calado limitado, que son montados en la costa facilitando así el montaje de los mismos. Ejemplo de este tipo de criterio pueden ser encontrados en sistema aerogenerador flotante de tipo TLP o semi-sumergible, en los cuales el calado es lo suficientemente pequeño como para montarlos cerca de la costa. Sin embargo, en estructuras con gran calado resulta imposible la aplicación de este tipo de criterios debido a la falta de profundidad. Las boyas de tipo Spar constituyen un claro ejemplo. En estos casos, los coeficientes restauradores deben proveer suficiente estabilidad como para mantener estable la estructura durante el remolque frente a la acción del viento. Valores aceptables para este tipo de criterios suelen situarse en torno a los 10° para el cabeceo.

Estabilidad operativa. Como ya se mencionó anteriormente, durante la operación del artefacto, tanto la plataforma como los sistemas de fondeo asociados deben proveer suficiente capacidad restauradora frente a la acción conjunta de viento y oleaje.

Cabeceo dinámico (ángulo máximo). Resulta importante que los desplazamientos dinámicos y aceleraciones no excedan los límites operativos de la turbina eólica en todos los estados de mar. Valores recomendables suelen estar situados en torno a 10 grados, asegurado que en estos estados de mar permanezca en torno a su posición vertical. Será necesario en este caso calcular el valor significativo para el cabeceo.

$$\xi_i + \sigma_i < 10^\circ. \quad (21)$$

donde ξ_i es el valor para el cabeceo y σ_i es el valor significativo para el mismo

Tensión máxima en los sistemas de fondeo. La tensión máxima no deberá exceder la tensión máxima en las líneas de fondeo. Existen expresiones que ayudan a establecer criterios de seguridad en las líneas de fondeo de un sistema flotante.

Slamming. Aunque resulta difícil de encontrar este fenómeno en estructuras de gran calado, como es el caso de las plataformas de tipo Spar, este fenómeno de "golpeteo", se produce habitualmente cuando la superficie del fondo un buque impacta sobre la superficie libre del mar.

Existen otro tipo de limitaciones, relacionadas con la integridad estructural, el impacto ambiental, la operatividad en el transporte... que pueden ser incluidas junto a las expuestas anteriormente.

5. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

A lo largo del presente trabajo se ha expuesto el desarrollo de dos herramientas destinadas específicamente al estudio de aerogeneradores marinos. La primera de ellas, FASTLognoter permite un estudio pormenorizado y optimización de aerogeneradores tanto terrestres como marinos. Incorpora una serie de preprocesadores adicionales que ayudan al usuario y diseñador a realizar un mejor análisis de aerogeneradores. En segundo lugar ha sido presentado MorisonForm, una herramienta destinada a la obtención de la respuesta dinámica de aerogeneradores marinos flotantes. Ha sido presentado una aplicación práctica de ambas herramientas, mediante la optimización y el análisis de un aerogenerador marino basado en la plataforma NREL 5-Mw. Ambas herramientas permiten el análisis paramétrico de aerogeneradores marinos. Se ha mostrado, en el estudio presentado cómo es posible modificar parámetros relacionados con la ecuación dinámica del aerogenerador marino, en

este caso la masa de la parte expuesta al viento, con una reducción aproximadamente del 30%. Sin embargo, queda patente que es posible actuar en otras áreas relacionadas con la restauración del sistema, amortiguamiento, etc. Aun así, es preciso avanzar más, en la mejora de estas herramientas incorporando nueva formulación, actuando en nuevas áreas aun poco maduras, relacionadas con determinados fenómenos que envuelven a un sistema aerogenerador flotante marino, como pueden ser: la interacción con el fondo marino, el estudio del impacto de iceberg o buques, estudio de pérdidas de líneas de fondeo, estabilidad en averías... Se presentan como línea de futuro y de mejora de ambas herramientas, el desarrollo de herramientas que permitan estudiar a fondo los sistemas de fondeo incorporados a los aerogeneradores marinos, así como, su optimización y mejora, incorporando su interacción al sistema global dinámico.

Bibliografía

- [1] Burton T. Wind energy Handbook. Second Edition, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-69975-1, UK, 2011.
- [2] Hau E. Wind turbines fundamentals, technologies: application and economics. Springer. ISBN: 3540242406; 2004.
- [3] Manwell JF. Wind Energy Explained. John Wiley & Sons, ISBN: 0471960446; 2002.
- [4] Sathyajith M. Wind energy fundamentals, resource analysis and economics. Springer, ISBN: 9783540309055; 2006.
- [5] Gutiérrez JE, García J, Zamora B, Peyrau MR, FAST Lognoter: Integración de herramientas para el cálculo de aerogeneradores 'Offshore', 50º Congreso de Ingeniería Naval e Industria, Cádiz, 2011.
- [6] Gutiérrez JE, García J, Zamora B, Esteve J, Analysis of platforms for offshore wind turbines, Research Souk, Cartagena, 2012.
- [7] Jonkman JM. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine, Technical Report NREL/TP-500-41958, National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2007.
- [8] Jonkman JM, Buhl Jr ML. FAST user's guide. Technical Report NREL/EL- 500-38230, National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2005.
- [9] Laino DJ, Hansen AC, Users guide to the wind turbine aerodynamics computer software Aerodyn, Windward Engineering LC, www.windwardengineering.com, Spanish Fork, USA; 2002.
- [10] Moriarty PJ, Hansen AC, AeroDyn theory manual, Technical Report NREL/TP-500-36881, National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2005.
- [11] Kooijman HJT, Lindenburg C, Winkelaar D, Van der Hooft EL. DOWEC 6 MW Pre-Design: Aero-elastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS. DOWEC-F1W2-HJK-01-046/9; 2003. http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/wind/docs/dowec/10046_009.pdf, accessed 16 July 2012.
- [12] Lindenburg C, Aeroelastic modelling of the LMH64-5 blade. DOWEC-02-KL 083/0; 2002. http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/wind/docs/dowec/10083_001.pdf, accessed 16 July 2012.
- [13] Jonkman JM, Butterfield S, Musial W, Scott G, Definition of a 5MW reference wind turbine for offshore system development, Technical Report NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2009.
- [14] Bir GS. User's guide to BModes. Software for computing rotating beam coupled modes, Technical Report NREL/TP-500-38976, National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2005.
- [15] Wilson RE, Walker SN, Heh P, Technical and user's manual for the FAST-AD advanced dynamics code. NREL Report 99-01. Oregon State University, USA; 1999.
- [16] Ahlstrom A, Aeroelastic simulation of wind turbine dynamics, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden; 2005.
- [17] Kane RT, Levinson DA, Dynamics: theory and applications, McGraw-Hill; New York, 1985.
- [18] Leishman JG, Beddoes TS, A semiempirical model for dynamic stall. J Am Helicopter Society 1989; 34:3?17.
- [19] Pitt DM, Peters DA. Theoretical prediction of dynamic-inflow derivatives, Vertica 1981;5(1):21?34.
- [20] Morison JR, O'Brien MP, Johnson JW, Schaaf SA, The force exerted by surface wave on piles. Journal Petroleum Transactions 1950;189: 149?54.
- [21] Faltinsen OM, Sea Loads on Ship and Offshore Structures, Cambridge University Press, ISBN: 0-521- 45870-6, UK, 1990.
- [22] Lewis EV, Principles of Naval Architecture. Vol. III. Motions in Waves and Controllability, SNAME, ISBN: 0939773023, USA, 1990.
- [23] Tracy C, Parametric design of floating wind turbines, M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2007.
- [24] Passon P, Kühn M., Butterfield S, Jonkman J, Camp T, Larsen TJ. OC3-Benchmark exercise of aeroelastic offshore wind turbine codes, Conference Paper NREL/CP-500-41930. National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2007.
- [25] Vorpahl FR, Wingerde AV, Blunk M, Busmann HG, Kleinhanst S, Kossel T, et al. Validation of a finite element based simulation approach of offshore wind turbines within IEA Wind Annex XXI-II-Simulation challenges and results for a 5?MW turbine on a tripod substructure. In: 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan; 2009, pp. 362?9.
- [26] Jonkman JM, Definition of the floating system for Phase IV of OC3, Technical Report NREL/TP-500- 47535, National Renewable Energy Laboratory, www.osti.gov/bridge, Colorado, USA; 2010.
- [27] Rao SS, Mechanical vibration. Fifth edition, Prentice Hall, ISBN: 0132128195, USA, 2010.
- [28] Hansen AC. NWTC Design codes (AirfoilPrep). <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/airfoilprep/>, accessed 16 July 2012.
- [29] Du Z. Selig MS, A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction. In ASME Wind Energy Symposium, and 36th AIAA- 1998-21 Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno (Nevada), USA; 1998, pp. 12 ? 5.
- [30] API RP 2A-WSD, 22nd Edition, Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore steel platforms – Working stress design, American Petroleum Institute.
- [31] Matha D, Schlif M, Cordle A, Pereira R, Jonkman J, Challenges in Simulation of Aerodynamics, Hydrodynamics, and Mooring-Line Dynamics of Floating Offshore Wind Turbines, Conference Paper, NREL/CP-5000-50544, 2011.
- [32] Lee CH, WAMIT theory manual. Report No. 95_2, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge (Mass.), USA; 1995.
- [33] Jonkman J. M., Buhl Jr, Load analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation, WindPower Conference & Exhibition, Los Angeles, California, USA, 2007.
- [34] Twidell, J., & Gaudiosi, G, Offshore Wind Power. Multi-Science Pub. Co., ISBN: 978-09005622-639, UK, 2009.
- [35] Karimirad M, Meissonnier Q, Gao Z, Moan T, Hydroelastic code-to-code comparison for a tension leg spar-type floating wind turbine. Marine Structures, 24:412_35, 2010.
- [36] Holmas T, Amdahl J, Design of floating wind turbines, Computational methods in marine engineering III. Trondheim, Norway, 2009.
- [37] Roddier, D., & Christian, C, WindFloat: a floating foundation for offshore wind turbines. Part I: Design Basis and qualification process. OMAE 2009 – 79229. Hawaii, USA, 2009.
- [38] Sclavounos PD, Surface Waves and their interaction with Floating bodies, Lecture Notes, Cambridge MA, MIT, USA, 2005.
- [39] Wayman, E, Coupled Dynamic and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems. M. S. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. USA. 2006.
- [40] Withee, J, Fully Couple Dynamic Analysis of Floating Wind Turbine System. Ph.D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology. USA, 2004.